

# 論文 高炉スラグ微粉末とシリカフェームを用いた高強度コンクリートの自己収縮について

小亀 大佑\*1・菅田 紀之\*2・横川 慶介\*1

**要旨：**高炉スラグ微粉末とシリカフェームを用いた高強度コンクリートの自己収縮特性について検討するために、水結合材比を 25 %および 30 %の 2 水準、シリカフェームの置換率を結合材の 0 %から 20 %、高炉スラグ微粉末の置換率を 0 %から 40 %に変化させた 18 ケースの高強度コンクリートについて圧縮強度試験および自己収縮試験を行った。その結果、シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末の添加により材齢 28 日圧縮強度は低下すること、シリカフェームは初期材齢時の自己収縮を低減すること、高炉スラグ微粉末は極初期材齢時における自己収縮を低減させ、その後の材齢 90 日までは自己収縮を増加させることを示した。

**キーワード：**高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、高強度コンクリート、自己収縮、圧縮強度

## 1. はじめに

我が国で発生する産業副産物のうち高炉水砕スラグは製鉄過程において大量に副産されている。この高炉水砕スラグは高炉セメントの混合材、コンクリート用混和材、地盤改良材、コンクリート用骨材などに利用されている。この高炉水砕スラグを微粉砕した高炉スラグ微粉末を高炉セメント用混合材あるいはコンクリート用混和材として用いた場合、セメント使用量が減ることによるコンクリート製造に起因する CO<sub>2</sub> 排出量の削減効果が期待できる。さらに水和熱の抑制、耐海水性向上効果などがある。また、産業副産物の一種であるシリカフェームは高強度コンクリート用混和材として利用されており、これまで高炉スラグ微粉末あるいはシリカフェームを混和したコンクリートに関する研究は多く行われてきている。高強度コンクリートでは、その自己収縮が大きくなることが知られており、これら混和材の影響についても明らかにする必要がある。自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響に関しては、混和量および粉末度が高くなると自己収縮が大きくなるという報告<sup>1)</sup>、高炉スラグ微粉末中の石こう量が増えると自己収縮が小さくなるという報告<sup>2)</sup>がある。自己収縮に及ぼすシリカフェーム混和の影響に関しては、シリカフェームの混和量が多くなると自己収縮が大きくなるという報告<sup>3)</sup>がある。これらの混和材の影響については、それ以後いくつか研究がおこなわれてきている。しかしながら、高炉スラグ微粉末とシリカフェームを併用した圧縮強度が 80 N/mm<sup>2</sup> を超えるような高強度コンクリートの特性については不明な点が多い。

本研究では、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームの混和が高強度コンクリートの自己収縮にどのような影響を及ぼすのか明らかにするために、水結合材比を 25 %および 30 %とし、高炉スラグ微粉末の結合材に対する置

換率を 0 %から 40 %、シリカフェーム置換率を 0 %から 20 %まで変化させた高強度コンクリートの圧縮強度試験および自己収縮試験を行い検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料

本研究において高炉スラグ微粉末とシリカフェームを併用した高強度コンクリートの製造に用いた材料を表-1 に示す。結合材として普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを用いた。使用した高炉スラグ微粉末は JIS の高炉スラグ微粉末 6000 の品質を満足する比表面積 6,070 cm<sup>2</sup>/g および 6,010 cm<sup>2</sup>/g、密度 2.89 g/cm<sup>3</sup> のものである。シリカフェームはノルウェー産の粉体系のものであり、比表面積は 200,000 cm<sup>2</sup>/g、

表-1 使用材料

材 料	性 質 等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm <sup>3</sup>
高炉スラグ 微粉末 (BFS)	比表面積：6,070 cm <sup>2</sup> /g (W/B= 25%) 6,010 cm <sup>2</sup> /g (W/B= 30%) 密度：2.89 g/cm <sup>3</sup> 石こう添加量：約 5 %
シリカフェーム (SF)	比表面積：200,000 cm <sup>2</sup> /g 平均粒径：0.2 μm 密度：2.2 g/cm <sup>3</sup> SiO <sub>2</sub> 量：97 %
細骨材 (S)	陸砂 表乾密度：2.73 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材 (G)	JIS A5005 砕石 2005 表乾密度：2.66 g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系
消泡剤 (AF)	ポリエチレングリコール系

\*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学系専攻 (学生会員)

\*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域准教授 博 (工) (正会員)

表-2 配合およびフレッシュ性状

	W/B (%)	SF/B (%)	BFS/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								スランプフロー(cm)	空気量 (%)
					W	C	SF	BFS	S	G	SP	AF		
25-00-00	25	0	0	49	166	664	0	0	821	833	3.12	0.006	42	1.6
25-00-20	25	0	20	49	166	531	0	133	816	827	2.16	0.005	45	1.6
25-00-40	25	0	40	49	166	398	0	266	811	822	2.25	0.007	43	1.6
25-10-00	25	10	0	49	166	598	66.4	0	809	820	6.64	0.013	69	1.1
25-10-20	25	10	20	49	166	465	66.4	133	803	815	5.64	0.014	68	1.6
25-10-40	25	10	40	49	166	332	66.4	266	798	809	4.64	0.014	70	1.2
25-20-00	25	20	0	49	166	531	133	0	797	808	8.96	0.018	65	0.8
25-20-20	25	20	20	49	166	398	133	133	792	803	8.30	0.017	68	0.8
25-20-40	25	20	40	49	166	266	133	266	786	797	6.64	0.020	65	1.5
30-00-00	30	0	0	49	165	550	0	0	868	890	2.86	0.008	58	0.5
30-00-20	30	0	20	49	165	440	0	110	863	885	2.31	0.007	57	0.8
30-00-40	30	0	40	49	165	330	0	220	859	881	2.15	0.006	62	0.4
30-10-00	30	10	0	49	165	495	55	0	858	879	5.78	0.017	67	2.4
30-10-20	30	10	20	49	165	385	55	110	853	875	4.95	0.015	67	0.9
30-10-40	30	10	40	49	165	275	55	220	849	871	4.02	0.012	64	1.3
30-20-00	30	20	0	49	165	440	110	0	847	869	8.25	0.025	67	1.9
30-20-20	30	20	20	49	165	330	110	110	843	865	6.88	0.021	65	1.3
30-20-40	30	20	40	49	165	220	110	220	839	860	5.50	0.017	65	1.1

$$B = C + SF + BFS$$

平均粒径は約 0.2 μm、密度は 2.2 g/cm<sup>3</sup> のものである。細骨材としては陸砂、粗骨材としては JIS の砕石 2005 を用いた。また、流動性を確保するためにポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤、空気量を調整するためにポリエチレングリコール系の消泡剤を用いた。

## 2.2 配合

本研究に用いた高炉スラグ微粉末とシリカフェームを併用した高強度コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-2に示す。水結合材比 (W/B,  $B=C+BFS+SF$ ) を 25%および30%の2水準, シリカフェーム置換率 (SF/B) を 0%, 10%および20%の3水準, 高炉スラグ微粉末置換率 (BFS/B) を 0%, 20%および40%の3水準の配合とした。また, 目標スランプフローは材料分離を配慮して, W/B=25%の配合で BFS/B=0%では 45 cm, W/B=30%の配合で BFS/B=0%では 60 cm, その他の配合では 65 cm とした。目標空気量については全ケースにおいて 1.0%として, 配合を決定した。各配合で練混ぜたコンクリートの W/B=25%のスランプフローの実測値は, 目標フロー45 cm に対して 42~45 cm, 目標フロー65 cm に対して 65~70 cm, 空気量の実測値は 0.8~1.6%であった。W/B=30%のスランプフローの実測値は, 目標フロー60 cm に対して 57~62 cm, 目標フロー65 cm に対して 64~67 cm, 空気量の実測値は, 0.4~2.4%であった。

## 2.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従い行った。試験には直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱供試体を用い, 3 本の結果の平均を圧縮強度とした。供試体の養生は材齢 1 日ま

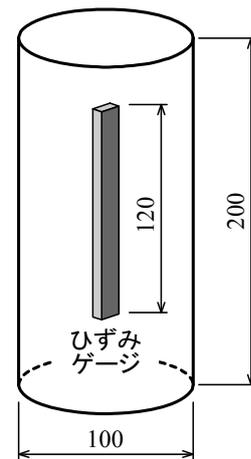


図-1 自己収縮試験用供試体

で 20 °C の恒温室における封かん養生, それ以降は 20 °C の水中養生とした。供試体の打込み面の処理は研磨機による研磨仕上げとした。

## 2.4 自己収縮試験

自己収縮試験は, 図-1 に示すような直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱供試体の中央軸方向に埋込み型ひずみゲージ (ゲージ長 120 mm, 弾性係数 2.75 GPa) を配置して行った。また, 供試体中央に配置した熱電対により温度測定を行い, 線膨張係数を  $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  としてひずみの補正を行った。ひずみの測定は型枠にコンクリートを打込んだ後から封かん状態で行い, 凝結始発を起点として以後のひずみ変化を自己収縮ひずみとした。供試体作成に用いた型枠は鋼製缶であり, シート等による型枠面の付着処理の有無が自己収縮ひずみに及ぼす影響は小さかった

ため、付着処理を行わずに型枠にコンクリートを打込んだ。また、型枠上面はポリエチレンシートおよびアルミテープを用いて封かん処理を行った。試験環境は温度 20℃である。測定本数は各ケースで 2 本であり、測定結果の 2 本の平均を自己収縮ひずみとした。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 圧縮強度

図-2 および 3 は材齢 28 日における W/B=25% および 30% の圧縮強度を示している。配合は W/B-SF/B-BFS/B で表示している。図-2 から W/B=25% の配合において、105~120 N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度が得られていることがわかる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなっていることが確認できる。特にシリカフューム置換率 SF/B=20% において、圧縮強度の減少が大きくなっている。このケースでは、シリカフューム量と高炉スラグ微粉末量の和が多いため、セメント量が少なくなっていることにより、水和反応により生成される水酸化カルシウムが少なく、材齢 28 日の段階ではシリカフュームのポゾラン反応および高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応に必要な水酸化カルシウムが不足し、圧縮強度が減少したものと考えられる。高炉スラグ微粉末置換率 BFS/B=0% において、シリカフューム混和の影響について着目すると、シリカフューム置換率が大きくなるに従い圧縮強度が若干小さくなっていることが分かる。その程度は、シリカフューム置換率 SF/B=0% における高炉スラグ微粉末の影響より小さい。図-3 から W/B=30% の配合において、82~105 N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度が得られていることがわかる。W/B=25% と同様に高炉スラグの置換率が大きくなるに従い圧縮強度が小さくなっていることが確認できる。特にシリカフューム置換率 SF/B=20% において、圧縮強度の減少が大きくなっている。W/B=30% の配合でも、シリカフューム置換率 SF/B=20% において、水和反応により生成される水酸化カルシウムが少なく、シリカフュームのポゾラン反応および高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応に必要な水酸化カルシウムが不足していることが推察される。

#### 3.2 自己収縮

図-4 に W/B=25%、図-5 に W/B=30% における材齢と自己収縮の関係を示す。両図とも、図 (a) は BFS/B=0%、図 (b) は SF/B=0%、図 (c) は SF/B=10%、図 (d) は SF/B=20% の結果である。また、左図は材齢 14 日まで、右図は材齢 90 日までの結果である。まず、図-4 の W/B=25% について検討を行う。図 (a) によりシリカフュームを単独使用した場合について検討する。シリカフュームを混和することにより、初期の自己収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。材齢 14 日に

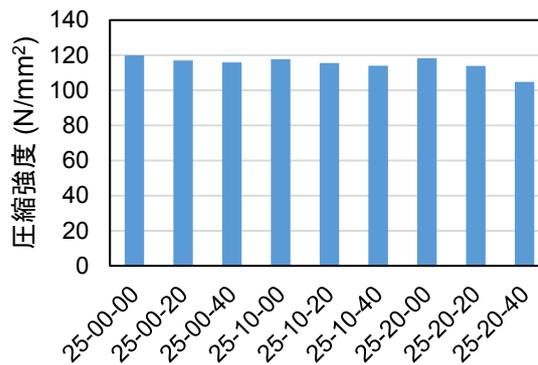


図-2 圧縮強度 (W/B = 25%)

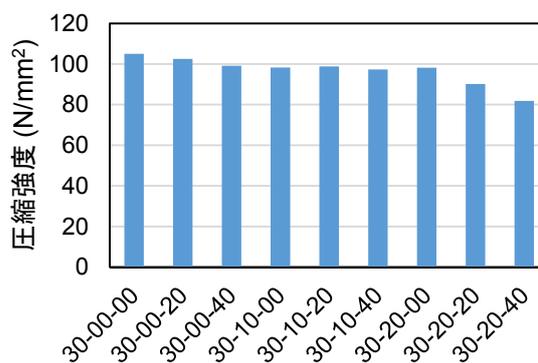


図-3 圧縮強度 (W/B = 30%)

においてシリカフューム未混和の自己収縮ひずみが 289 μm であるのに対して、234 μm および 269 μm である。しかしながら、SF/B=20% では材齢 30 日以後、収縮ひずみが SF/B=0% よりも大きくなっている。また、材齢 20 日以後のひずみの増加量は SF/B=0% および 10% よりも大きくなっている。これは継続的に起こっているポゾラン反応による細孔構造の緻密化あるいは自己乾燥の進行の影響ではないかと考えられる。シリカフュームの使用により初期の自己収縮が小さくなるという結果は、今本等の結果<sup>3)</sup>とは異なるものであった。この要因の一つとしてはシリカフュームの性質が考えられる。図 (b) により高炉スラグ微粉末を単独使用した場合について検討する。高炉スラグ微粉末を混和することにより、収縮ひずみ立ち上がり時のひずみ増加率が小さくなっていることがわかる。しかしながら、材齢 1 日までには逆転している。また、材齢 4 日程度までの初期の自己収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。それ以後については、高炉スラグ微粉末の混和により収縮ひずみが若干大きくなっているが、収縮ひずみの差は小さい。収縮ひずみの増加率は材齢 7 日程度までが大きく、材齢 20 日以後の増加率は小さくなっている。収縮ひずみ立ち上がり時において、高炉スラグ微粉末が多いほどひずみ増加率が小さくなる要因としては、セメント量が少ないため水和反応量が少なくなること、およびそれに伴い水酸化カルシウム生成

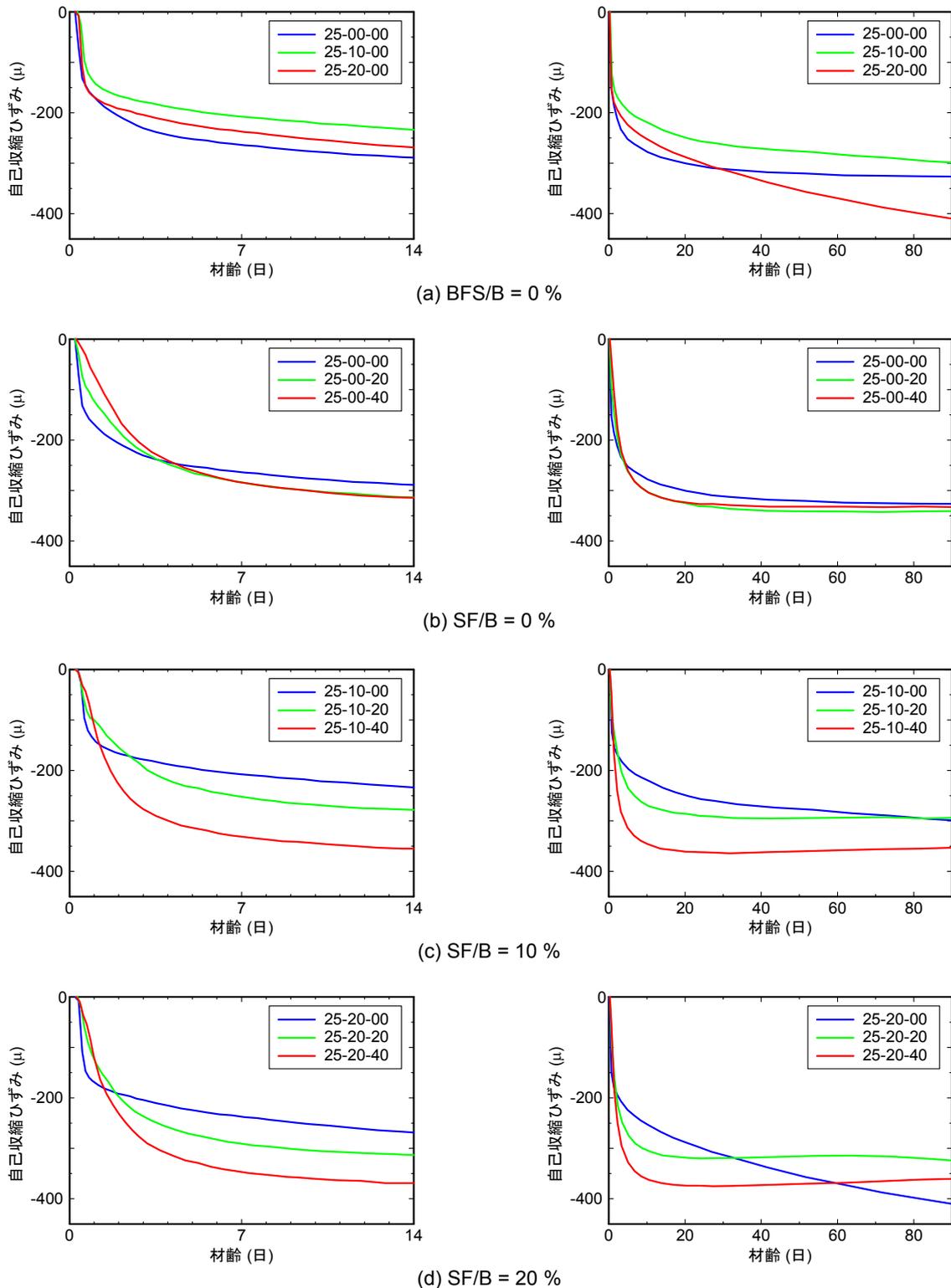


図-4 自己収縮ひずみ (W/B = 25%)

量が少なくなり高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応の進行が遅くなることにより、高炉スラグ微粉末が多いほど全体の水硬反応速度が小さくなったことが考えられる。次に図 (c) および図 (d) によりシリカフェームと高炉スラグ微粉末を併用した場合について検討する。図 (c) の SF/B = 10%より、高炉スラグ微粉末の混和による材齢初期における自己収縮の低減は、前述した水硬反応速度

の低下によるものと考えられる。その低減期間は SF/B = 0%の場合より短くなっていることがわかる。また、材齢 1 日程度以後の収縮ひずみの増加率は BFS/B = 40%において大きくなっている。材齢 14 日における BFS/B = 0%のひずみ 234 μに対して BFS/B = 20%では 278 μ、BFS/B = 40%では 355 μである。材齢 30 日以後において、BFS/B = 0%では収縮ひずみが継続的に増加しているのに対し

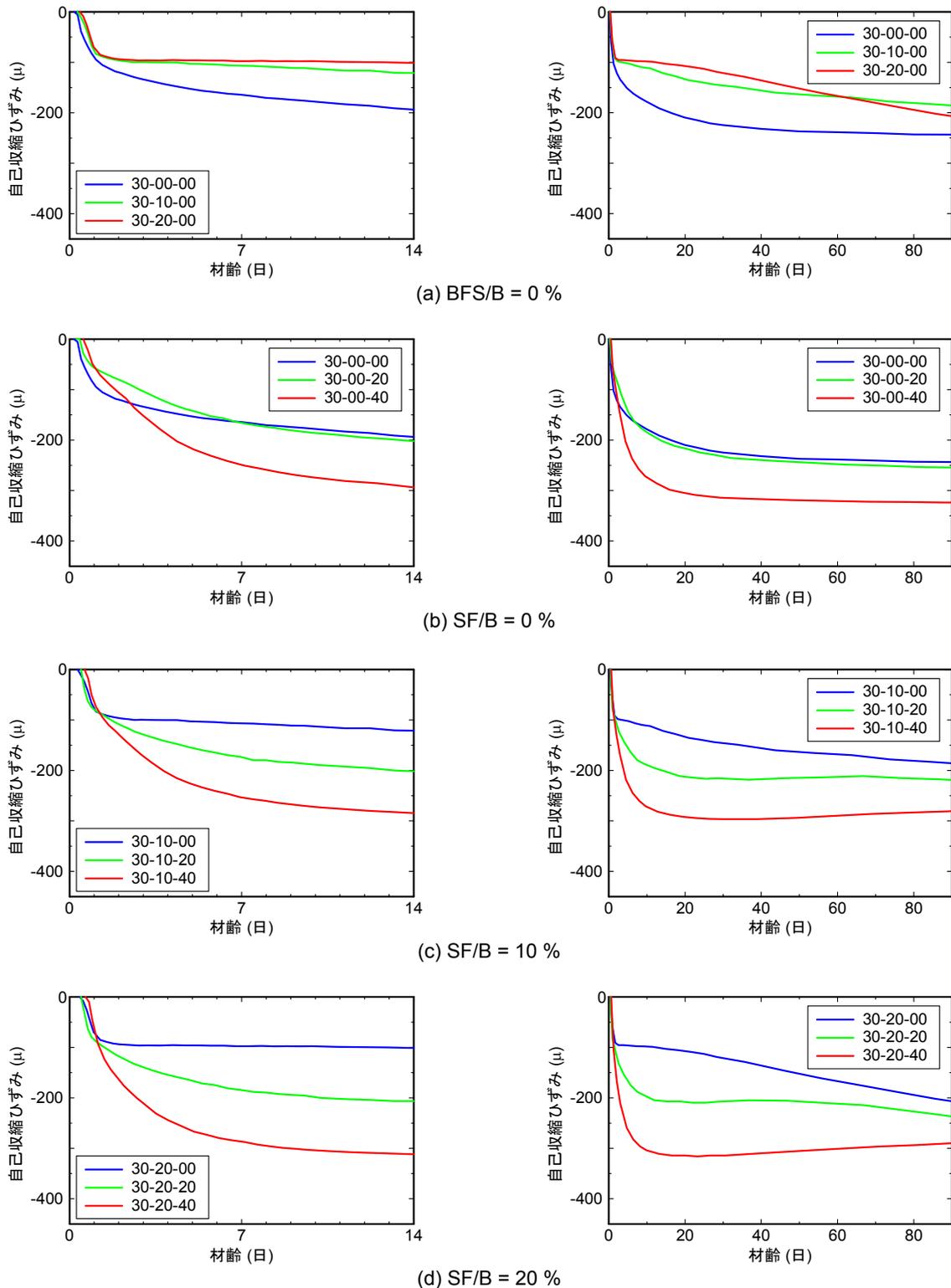


図-5 自己収縮ひずみ (W/B = 30%)

て、BFS/B = 20%ではひずみがほぼ一定。BFS/B = 40%ではひずみが若干減少している。図 (d) の SF/B = 20% の自己収縮ひずみは SF/B = 10%と類似した結果になっており、収縮ひずみ立ち上がり時のひずみ増加率は、高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど小さくなり、材齢 1 日までに増加率が逆転している。材齢 14 日における BFS/B = 0%の収縮ひずみ 269 μに対して BFS/B = 20%で

は 313 μ、BFS/B = 40%では 369 μである。また、BFS/B = 40%では材齢 20 日以後においてひずみが若干減少している。以上より W/B = 25%では、シリカフェームと高炉スラグ微粉末を併用した場合、高炉スラグ微粉末は極初期における自己収縮を低減させ、材齢数日以後においては自己収縮を増加させるといえる。

図-5の W/B = 30%について検討を行う。図 (a) に

よりシリカフェームを単独使用した場合について検討する。シリカフェームを混和することにより、自己収縮ひずみの立ち上がり材齢が遅くなっていることが分かる。また、材齢 1 日から 20 日程度までのひずみ増加量は小さくなっている。材齢 14 日においてシリカフェーム未混和の自己収縮ひずみが 194  $\mu$  であるのに対して、121  $\mu$  および 101  $\mu$  である。SF/B=20%では材齢 20 日以後のひずみ増加量が SF/B = 0 % および 10 % よりも大きくなっている。これも W/B = 25 % のケースと同様に、材齢 20 日以後における継続的なポズラン反応による細孔構造の緻密化あるいは自己乾燥の進行の影響ではないかと考えられる。図 (b) により高炉スラグ微粉末を単独使用した場合について検討する。高炉スラグ微粉末を混和することにより、自己収縮ひずみの立ち上がり材齢が遅くなり、材齢 2 日あるいは 7 日程度までの初期の自己収縮ひずみが小さくなっていることがわかる。それ以後の材齢については、BFS/B = 20 % で高炉スラグ微粉末未混和と同程度、BFS/B = 40 % では 80 ~ 100  $\mu$  大きくなっている。また、収縮ひずみの増加量は材齢 14 日程度までが大きく、それ以後の増加量は小さくなっている。高炉スラグ微粉末が多いほどひずみの立ち上がり材齢が遅くなる要因としては、セメント量が少ないため水和反応量が少なくなること、およびそれに伴い水酸化カルシウム生成量が少なくなり高炉スラグ微粉末の潜在水硬反応の進行が遅くなることにより、高炉スラグ微粉末が多いほど全体の水硬反応速度が小さくなったことが考えられる。次に図 (c) および図 (d) によりシリカフェームと高炉スラグ微粉末を併用した場合について検討する。図 (c) の SF/B = 10 % より、高炉スラグ微粉末の混和により収縮ひずみの立ち上がり材齢は、SF/B = 0 % のケースと同様に遅くなっているが、材齢初期における自己収縮の低減はなく、材齢 14 日程度までのひずみ増加量は高炉スラグ微粉末の混和量が多いほど大きくなっている。材齢 14 日における BFS/B = 0 % のひずみ 121  $\mu$  に対して BFS/B = 20 % では 202  $\mu$ 、BFS/B = 40 % では 285  $\mu$  である。材齢 20 日以後において、BFS/B = 0 % では収縮ひずみが継続的に増加しているのに対して、BFS/B = 20 % ではひずみがほぼ一定。BFS/B = 40 % ではひずみが若干減少している。これは、W/B = 25 % のケースと同様な傾向である。図 (d) の SF/B = 20 % の自己収縮ひずみは SF/B = 10 % と類似した結果になっており、材齢 14 日における BFS/B = 0 % の収縮ひずみ 101  $\mu$  に対して BFS/B = 20 % では 206  $\mu$ 、BFS/B = 40 % では 312  $\mu$  である。また、BFS/B = 20 % および 40 % では材齢 20 日以後において収縮ひずみが若干減少している。以上より W/B = 30 % では、シリカフェームと高炉スラグ微粉末を併用した場合、高炉スラグ微粉末は自己収縮ひずみの立ち上がり材齢を遅らせ、材齢 20 日程度

までの自己収縮の増加量を大きくさせるといえる。

W/B = 25 % と W/B = 30 % の自己収縮の比較では、図 (a) において W/B = 25 % のシリカフェーム単独使用時の自己収縮ひずみが継続的に増加しているのに対して、W/B = 30 % ではほとんどひずみ増加しない期間があること、図 (b) において W/B = 25 % の材齢 4 日以降の自己収縮ひずみが高炉スラグ置換率によらずほぼ等しいのに対して W/B = 30 % の BFS/B = 40 % の収縮ひずみが他より大きくなっていることなど、異なる傾向を示す場合がある。しかしながら、SF/B と BFS/B が同一であれば、全てのケースで W/B = 25 % における自己収縮ひずみが大きくなっている。

#### 4. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末とシリカフェームを併用した高強度コンクリートの自己収縮特性を検討するために、水結合材比を 25 % および 30 %、高炉スラグ微粉末の結合材に対する置換率を 0 % から 40 %、シリカフェームの置換率を 0 % から 20 % に変えて、圧縮強度試験および自己収縮試験を行い、材齢 28 日における圧縮強度および材齢 90 日までの自己収縮ひずみを示した。その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末の混和は材齢 28 日における圧縮強度を低下させる。特に、シリカフェーム置換率 20 % における、高炉スラグ微粉末の混和による強度低下は大きい。
- 2) シリカフェームの単独混和は初期材齢における自己収縮を減少させる。
- 3) 高炉スラグ微粉末は自己収縮の立ち上がりを遅延、あるいは立ち上がり時における収縮ひずみの増加率を減少させる。
- 4) 高炉スラグ微粉末は極初期材齢における自己収縮を低減させるが、多くの場合、材齢 90 日までの自己収縮を増加させる。

#### 参考文献

- 1) 三浦智哉ほか：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No.1, pp.359-364, 1995
- 2) 原田克己・松下博通・後藤貴弘・三小田典史：高炉セメント使用コンクリートの高温化における歪み特性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No.2, pp.901-906, 2001
- 3) 今本啓一・大谷博：高強度・超高強度コンクリートの収縮性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No.1, pp.1061-1066, 1995